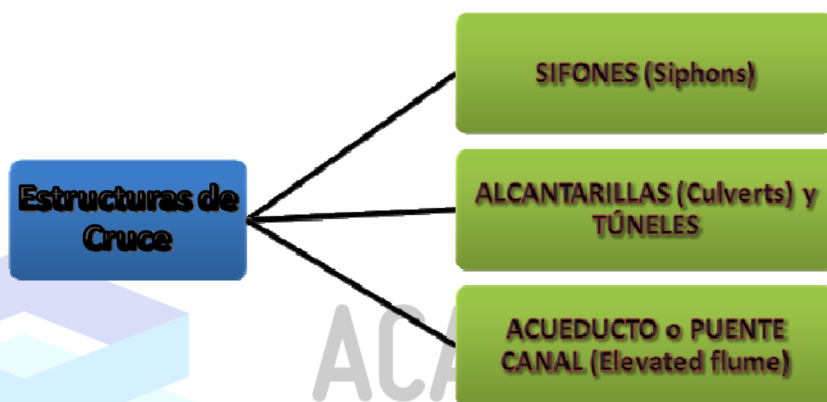
CURSO ONLINE DE HIDRÁULICA AVANZADA.
OBRAS HIDRÁULICAS EN CANALES.

Tema 2. ESTRUCTURAS DE CRUCE.

mcm@ingnova.es http://academia.ingnova.es/ 957 089 233 / 957 085 675

1. INTRODUCCIÓN.

La necesidad de integración del canal al terreno por el que circunda obliga al diseño de una serie de estructuras que lo posibiliten. De esta forma cuando exista la necesidad de cruzar un camino, vaguada o cualquier otro obstáculo del terreno será preciso el diseño de alguna estructura de cruce de las siguientes:



Los criterios para la elección de la estructura más adecuada en cada caso son:

- La lámina de agua en el canal, en su nivel normal va a superar la rasante del obstáculo, podrá optarse por el diseño de un sifón o un acueducto, e incluso por la combinación de ambos. La solución óptima ha de tomarse en virtud de criterios técnico-económicos lógicamente.
- Si el nivel de la lámina de agua va a quedar bajo la rasante del obstáculo a salvar, habrá de proyectarse una alcantarilla.

Una obra de cruce va a requerir, a la entrada y salida de la misma, unas estructuras de transición y protección, así por ejemplo en la entrada de un acueducto será preciso la disposición de un aliviadero que impida que posibles excesos de caudal circulante por el canal superen el caudal de diseño de la obra de cruce y comprometan su seguridad. Estas estructuras de transición y protección se verán en temas posteriores.



Acueducto, pilares de mampostería y canal de Madera. En Spring Mill, Mitchell, Indiana (US)



Acueducto Trasvase Tajo-Segura



Doble sifón Trasvase Tajo-Segura a su paso por Orihuela (Alicante)



Alcantarilla ejecutada con tubos de acero



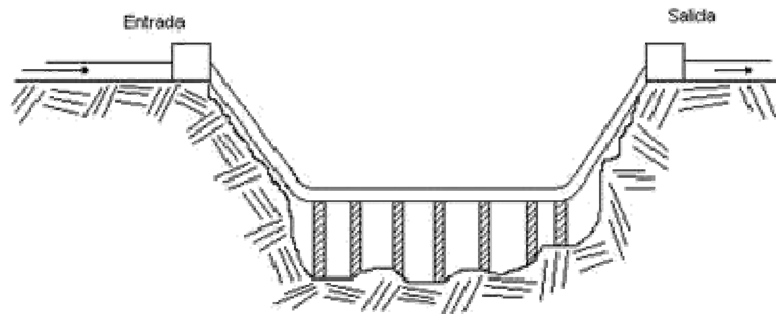
Alcantarilla ejecutada con marcos de HA.

Video nº 2.1. Aspectos Generales

2. SIFONES

Cuando es preciso cruzar depresiones del terreno podrá recurrirse a una conducción entubada que pasará bajo el accidente topográfico, constituyéndose un sifón invertido. Un sifón es un conducto cerrado diseñado para funcionar lleno de fluido y bajo presión.

mcm@ingnova.es http://academia.ingnova.es/ 957 089 233 / 957 085 675



Esquema de un sifón invertido superficial (http://fluidos.eia.edu.co)



Sifón de la Rambla de Algeciras (Murcia). Trasvase Tajo-Segura.

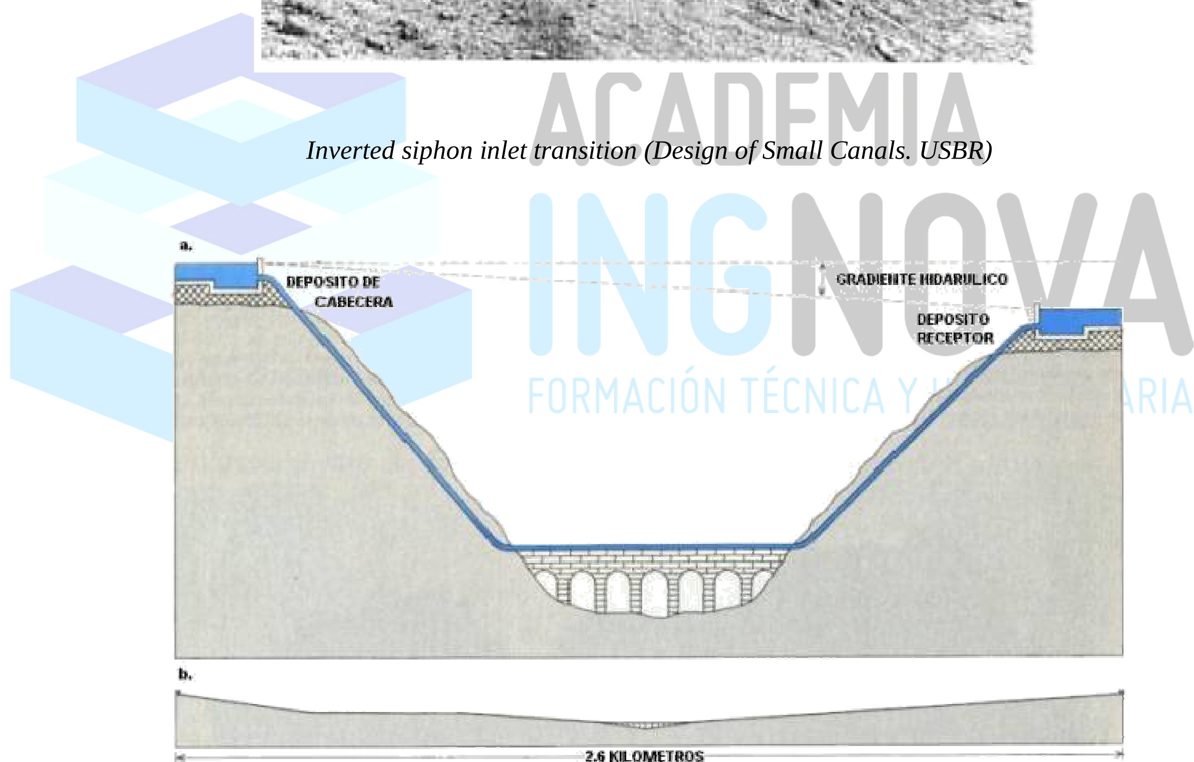
La tubería que conforma un sifón se encontrará normalmente bajo presión. Los sifones pueden ser aéreos o enterrados.

Como ya hemos comentado este tipo de obra, precisará de estructuras de entrada y de salida (*inlet and outlet structures*) para lograr condiciones de transición hidráulicamente eficientes, evitando perturbaciones superficiales, choques bruscos

contra las paredes y cambios de dirección pronunciados. Además de permitir el control de flujo y los trabajos de mantenimiento, mediante elementos de cierre.

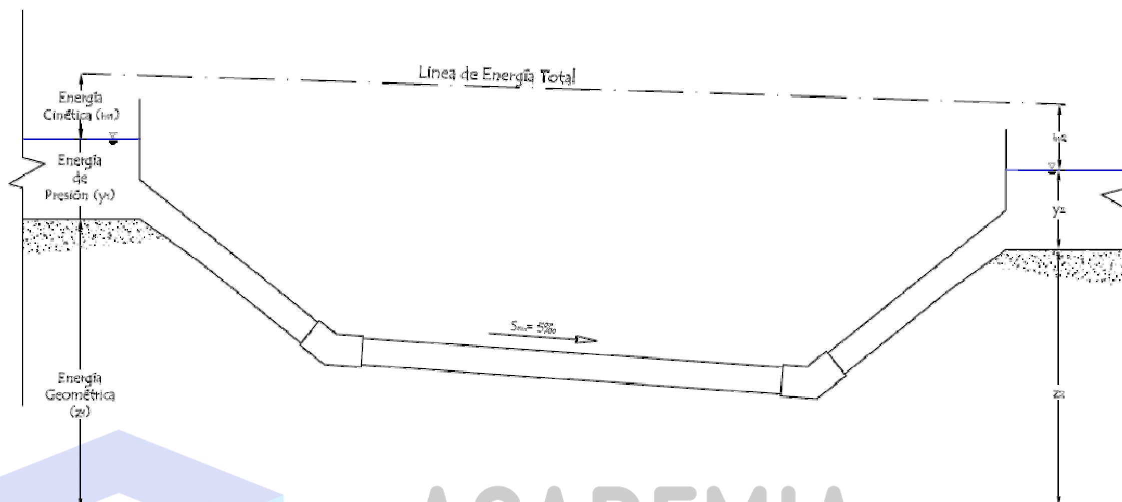


Inverted siphon inlet transition (Design of Small Canals. USBR)



SIFÓN ROMANO (http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articuloses/historia/roma/roma.html)

Para el diseño hidráulico de este tipo de estructura aplicaremos el principio de conservación de la energía entre las distintas secciones de la misma, de esta forma y atendiendo al gráfico siguiente:



Para un correcto diseño del sifón el total de pérdidas de carga deberá ser inferior a la carga hidráulica → **ΔH ≥ Δh_f**. En el caso de existir un tramo horizontal, deberá de adoptarse un pendiente mínima del, en línea con este aspecto, las pendientes de entrada y salida se definirán cuando estudiemos las estructuras de transición.

Las pérdidas de carga serán las siguientes:

- Pérdidas por transición de entrada y salida. Se pueden calcular a través de la expresión: $h_f = K.\frac{(v_{Tubo} - v_{Canal})^2}{2.g}$, El coeficiente K depende de las condiciones en la entrada y salida. La velocidad del canal (v_{canal}) será la velocidad en el canal de entrada o salida respectivamente. El USBR recomienda, para entradas de tipo recto o de cubierta partida (broken-back transition):

$$h_{f,e} = 0,4.\frac{(v_{Tubo} - v_{Canal})^2}{2.g}$$

$$h_{f,s} = 0,7.\frac{(v_{Tubo} - v_{Canal})^2}{2.g}$$



Broken-back transition

En la imagen, el canal de entrada es de grava, en estos casos los coeficientes anteriores se incrementan: de 0,4 a 0,5 y de 0,7 a 1,0.

- <u>Pérdidas de entrada en el propio tubo</u>. Obedecen a la expresión:

$$h_f = K_E.\frac{v_{Tubo}^{\;2}}{2.g}$$

Compuerta en pared delgada – contracción suprimida en los lados y en el fondo	1.00
Para entrada con arista en ángulo recto	0.5
Para entrada con arista ligeramente redondeada	0.23
Para entrada con arista completamente redondeada R/D = 0.15	0.10
Para entrada abocinada circular	0.004

Valores de K_E.

- <u>Pérdidas por rozamiento en el tubo</u>. Para evaluarlas existen multitud de formulaciones: Prantdl-Colebrook, Hazen_Williams, etc.

ACADEMIA INGNOVA
FORMACIÓN TÉCNICA Y UNIVERSITARIA

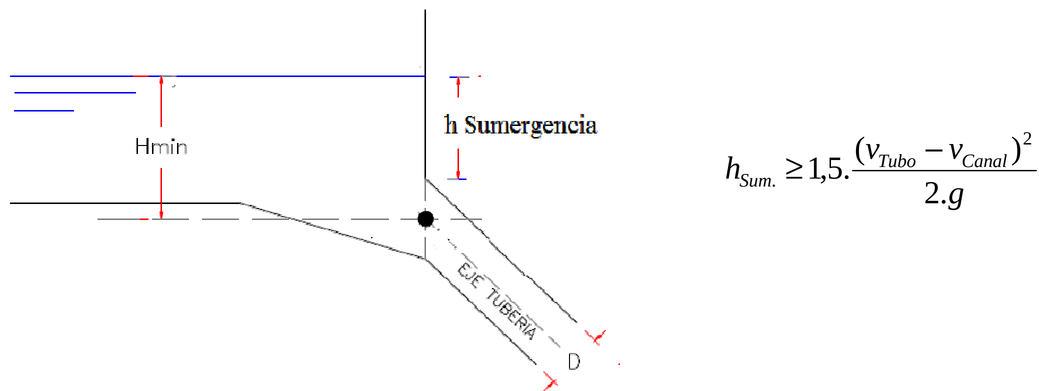
- Pérdidas en puntos singulares del tubo: codos, válvulas,… Se calculan asimismo como producto de un coeficiente de pérdidas de carga por la altura de velocidad: $h_f = K.\frac{v_{Tubo}^2}{2.g}$. En el caso de codos se puede aplicar la expresión: $h_f = 2{,}64.\sqrt{\alpha}.\frac{v_{Tubo}^2}{2.g}$, donde α es el ángulo, en grados, del codo.

Evaluadas todas las pérdidas de carga, su sumatoria, como hemos dicho, deberá ser inferior a la carga hidráulica total. Como criterio[1] que nos deje del lado de la seguridad pueden incrementar las pérdidas calculadas en un 10% → **$\Delta H \geq 1{,}1 \times \Delta h_f$.**

Para la selección del diámetro del tubo se recomiendan velocidades de diseño en torno a 2 – 3 m/s, mientras que en pequeños es de 1.6 m/s, un sifón es considerado grande, cuando su longitud es mayor que 500 veces el diámetro.

Ha de asegurarse así mismo que el tubo este siempre sumergido, dado que el sifón trabaja en carga, para ello se recomienda una carga mínima que asegure una altura mínima de sumergencia adecuada (*Hidraulic seal required*) o sello de agua, según el gráfico:

[1] USBR



$$h_{Sum.} \geq 1{,}5.\frac{(v_{Tubo} - v_{Canal})^2}{2.g}$$

El USBR recomienda que, independientemente del cálculo, el valor de la altura de sumergencia no sea inferior a 3” (7,62 cm).

2 1. Procedimiento de diseño

En aplicación de lo explicitados en los párrafos anteriores estableceremos un procedimiento para el cálculo de sifones.

1. <u>Determinación de la carga hidráulica disponible: (**ΔH**)</u>

Se calcula por diferencia entre las cotas de entrada y salida del sifón, entendidas como las cotas de los puntos aguas arriba y abajo de las respectivas transiciones de E/S, ambos puntos situados en el canal principal.

Carga hidráulica: **ΔH.**

2. <u>Selección del material y diámetro[2] del sifón: ϕ</u>

Según el caudal transportado y de la velocidad elegida. La velocidad estará en torno a 1-1,5 m/s para sifones cortos y de hasta 3,5 m/s en largos.

---

[2] Hablamos aquí de sifones constituidos por tuberías, que lo más común, si se tratase de otro tipo de sección, no circular, en este punto se determinaría el área.

Para seleccionar el material del tubo se deberán de considerar criterios de tipo técnico y económico, así como disponibilidad.

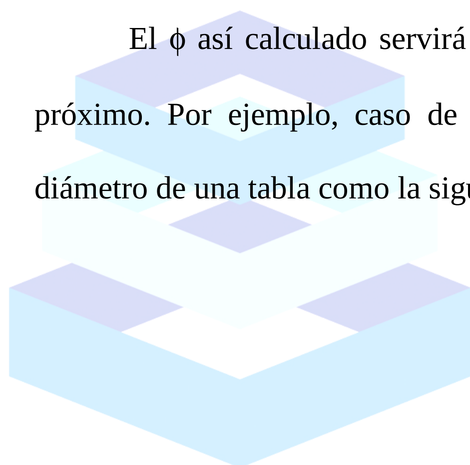
Para su cálculo, y una vez fijada la velocidad, se aplica la siguiente ecuación:

$$\phi = \sqrt{\frac{4.Q}{v.\pi}}$$

donde:

- ϕ: diámetro del sifón en m.
- Q: Caudal en m^3/s.
- v: velocidad en m/s.

El ϕ así calculado servirá para seleccionar el diámetro comercial superior más próximo. Por ejemplo, caso de elegir una tubería de hormigón seleccionaremos el diámetro de una tabla como la siguiente:



mcm@ingnova.es http://academia.ingnova.es/ 957 089 233 / 957 085 675

DN	Tolerancia en DN		espesores mínimos (mm)							
	Media (+/-mm)	Individual (+/- mm)	THAsCCh	THAD	THAcCCh Revest interior	THAcCCh Tubo	THAcCChP	THPCCh	THPCCh	THPM
200	4,0	8								
250	5,0	10			15	50	40			
300	6,0	12	60	40	15	50	40			
400	8,0	16	60	40	15	50	40			
500	8,5	17	60	40	20	55	45	50	40	45
600	9,0	18	65	45	20	60	45	50	40	45
700	9,5	19	65	45	20	65	45	50	40	50
800	10,0	20	70	50	20	70	45	50	45	55
900	10,5	21	75	55	20	75	45	55	45	60
1.000	11,0	22	85	60	20	80	50	65	50	65
1.100	11,5	23	90	65	25	85	50	70	50	70
1.200	12,0	24	100	65	25	95	50	75	60	75
1.250	12,0	24	105	70	25	100	50	75	60	80
1.300	12,0	24	110	70	25	105	50	80	65	82
1.400	12,0	24	115	75	25	110	50	85	70	85
1.500	12,0	24	125	80	25	115		90	70	90
1.600	12,0	24	135		25	125		100	75	95
1.800	12,0	24	150		30	140		115	75	105
2.000	12,0	24	165		40	155		125	80	115
2.100	12,0	24	180		40	165		130	85	120
2.200	12,0	24	185		40	170		135	90	125
2.400	12,0	24	200		45	185		145	100	135
2.500	12,0	24			45	195		150	100	140
2.600	12,0	24			45	200		160	110	145
2.800	12,0	24			45	215		170	120	155
3.000	12,0	24			45	220		180	130	165
3.200	12,0	24			45	230		190	140	
3.500	12,0	24			50	250		210	160	
4.000	12,0	24			55	290		240	180	

Dimensiones de los tubos de hormigón armado y postensado

(normas UNE-EN 639:1995 a 642:1995)[3]

Donde DN es el diámetro interior del tubo.

3. Cálculo de las pérdidas de carga

---

[3] Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX

Las pérdidas de carga se van a calcular, con la expresión $h_f = K.\frac{\Delta h_v^2}{2.g}$, y son, como hemos apuntado:

Pérdidas de carga	Coeficiente (K)	Δh_v
Transición de Entrada	0,1-0,5	$v_{Tubo}-v_{Canal}$
Entrada al tubo	0,004-1,0	v_{Tubo}
Fricción	(Se aplica cualquiera de las formulaciones existentes)	
Singularidades	(Variable, en codos depende del ángulo)	v_{Tubo}
Transición de Salida	0,2-1,0	

Evaluadas todas las pérdidas de carga, su sumatoria $\mathbf{\Delta h_f}$, se incrementara en un 10%.

4. Comprobación

Se comprueba que el diseño es adecuado, para ello ha de cumplirse que → $\mathbf{\Delta H \geq 1,1 \times \Delta h_f}$.

5. Diseño estructuras de entrada y salida

Una vez que el diseño hidráulico del sifón se admite como idóneo, es preciso diseñar correctamente las estructuras de entrada y salida, diseños que se abordarán en temas posteriores.

El diseño de la estructura de entrada debe contemplar que se cumple el condicionante del sello de agua (Hidraulic seal required).

Video nº 2.2. Cálculo Hidráulico de un sifón.

3. ALCANTARILLAS o TÚNELES

En el trazado de un canal la topografía del terreno puede obligar a la ejecución de **túneles** para evitar movimientos de tierras no asumibles económica, técnica y/o medioambientalmente hablando, o rodeos que impliquen un incremento muy importante de la longitud del canal.

Por otro lado el cruce con caminos, carreteras, etc, obligarán en otras ocasiones al diseño de **alcantarillas**.

El tipo de sección a usar responderá a criterios estructurales e hidráulicos, sin obviar los económicos, por supuesto. Es típico el uso de secciones ovoides en lámina libre y circulares en conducciones a presión, la razón fundamental es que una sección ovoide resiste mejor las cargas sobre ella y la circular la presión interna.

Podrán trabajar a presión o en lámina libre. Cuando un túnel trabaja a presión se le llama galería en carga.

Desde un punto de vista hidráulico no vamos a diferenciar entre túneles y alcantarillas, en ambos casos se tratara de un sección tipo que se intercala en el canal, con sus correspondientes *inlet and outlet structures.*

El diseño hidráulico del túnel o alcantarilla, determinara en un primer término la sección tipo precisa de manera que resulte una velocidad adecuada, según cuadro adjunto, y a continuación el diseño de las estructuras de transición de entrada y salida.

Tipo Obra	**Velocidad (≈)**
Alcantarillas	1,25 m/s
Túneles	1,5-2,5 m/s
Galerías a presión	2,5-4,5 m/s

Caso de optar por alcantarillas que trabajen a presión se deberá respetar una altura de sumergencia mínima, con idéntico criterio al expuesto en el epígrafe anterior.

La pendiente mínima deberá ser de un 5‰.

3 1. Procedimiento de diseño

Es similar al procedimiento visto para sifones, salvo que en el caso de las alcantarillas nos encontraremos muchos casos en los que se trabaje en lámina libre. Cuando se trabaje bajo presión se aconseja una velocidad de diseño de 1,25 m/s.

Cuando trabajemos en lámina libre nos interesará se establecerá un balance energético entre la salida y la entrada. No se deben alterar las condiciones hidráulicas del canal, por ejemplo un exceso demasiado significativo en el desnivel podría provocar un resalto en la salida. Al efecto vamos a usar el siguiente criterio de diseño: la velocidad en el interior de la alcantarilla y el canal serán, aproximadamente, las mismas.

Video nº 2.3. Diseño de alcantarillas

4. ACUEDUCTO

Su función es similar a la del sifón, optando por este tipo de estructura en base, como ya se ha comentado, a criterios técnico-económicos lógicamente, sin obviar los medioambientales.

Su diseño hidráulico es similar a las estructuras anteriores, si bien en este caso hay que prestar especial atención a la sección tipo, puesto que si se sobredimensiona en exceso el coste puede ser desorbitado, dado que el tipo de estructura es en sí costosa.

Normalmente la sección será rectangular o trapecial ejecutada en hormigón armado, debiendo disponerse de las preceptivas estructuras de transición en la entrada y la salida.



Acueducto del trasvase Tajo-Segura. Carrascosa del Campo, (Cuenca).



Sección rectangular en HA para Puente canal, con cajeros arriostrados para resistir el empuje hidrostático. Acueducto de Campos del Río (Murcia) Trasvase T-S.

Evidentemente existen otras soluciones constructivas, si bien nos centraremos en el diseño hidráulico que será igual, independientemente de la solución adoptada.

Algunos de los criterios de diseño para este tipo de obras son:

1. El régimen será subcrítico

2. La velocidad en el puente canal y el canal deben ser similares, aunque al modificar la sección, y probablemente la pendiente, diferirán.
3. Es recomendable conseguir calados iguales en el canal y acueducto.
4. Determinación del resguardo. Aplicando el criterio del USBR ($B.L. = k.\sqrt{y}$; siendo k=0,676 para caudales inferiores a 0,57 m³/s, y k=0,873 para caudales de hasta 85 m³/s), con un mínimo de 1/3 del calado.

Puede optarse, en estructuras importantes, por dotar al canal de una mayor pendiente que redunde en una disminución de la sección del canal, con los consecuentes ahorros de costes. En estos casos se deberá estudiar con detenimiento el perfil hidráulico.

Otras estructuras que han de ser diseñadas en el puente canal, será un vertedero de demasías aguas arriba del mismo, de esta forma se elimina la posibilidad de supera el caudal de diseño.

4 1. Procedimiento de diseño

Con los criterios expuestos con anterioridad, y de manera similar a los ejercicios anteriores, se diseña el acueducto.

En estos casos se debe prestar especial atención al perfil hidráulico y al borde libre, para lo cual se realizara un balance energético que nos permita determinar el calado en el inicio y final de las transiciones de entrada y salida. El problema lo analizaremos en las 4 secciones significativas:

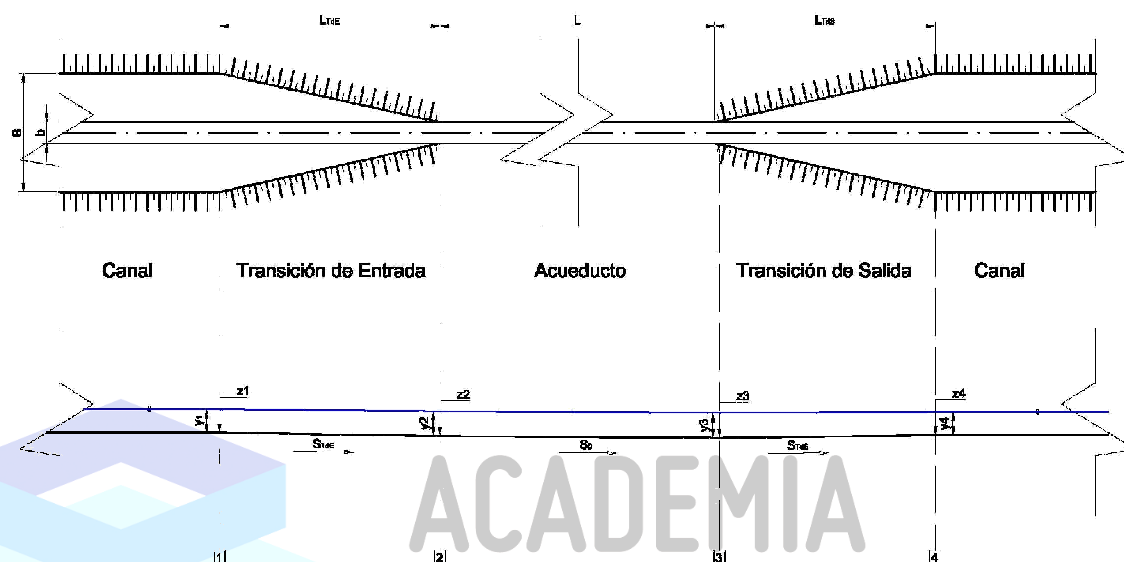
Sección 1. Inicio Transición de Entrada al Acueducto

Sección 2. Entrada Acueducto, final Transición de Entrada al Acueducto

Sección 3. Salida Acueducto, Inicio Transición de Salida del Acueducto

Sección 4. Final Transición de Salida del Acueducto

Según el croquis:



a) Características Hidráulicas del Canal

Serán las condiciones de partida, se deberá determinar el calado normal (y_N) y su velocidad (v_1). Las cotas al inicio de la transición de entrada y al final de la de salida serán datos de partida la cota z_1 y la longitud del acueducto. La cota z_2 se determina según las dimensiones de la transición.

b) Sección del acueducto

Se elige una sección rectangular, y se toma una velocidad de diseño próxima a 1 m/s. Caso de ser factible se procura que sea similar a la del canal.

c) Calculo del calado en la entrada al acueducto (y_2)

Aplicamos un balance de energía entre 1 y 2 → $H_1=H_2+h_f$. Donde h_f son las pérdidas en la transición de entrada. La ecuación se ha de resolver por un proceso iterativo.

d) Determinación de las características hidráulicas del acueducto

El calado y_2 determinara la velocidad, el radio hidráulico y el nº de Froude, y mediante la aplicación de la ecuación Manning: $S = \sqrt{\frac{v_2 . n}{R^{2/3}}}$, se calcula la pendiente.

e) Calculo cota salida acueducto (z_3)

Conocida la longitud y pendiente del acueducto y su cota de arranque, se puede calcular fácilmente la cota final → $z_3=z_2-L \times S$.

f) Calculo del calado en la salida al acueducto (y_3).

Aplicamos un balance de energía entre 2 y 3 → $H_2=H_3+h_f$. Donde h_f son las pérdidas por fricción. Calculada la energía en 3, se determina el calado por iteración o resolución numérica de la ecuación resultante.

g) Cálculo de la cota (z_4)

Se fija y_4, valor del calado en la sección 4, al calado normal. Con este valor se calcula la energía específica. Y dado que el valor de la energía total (E_4) se determina con $H_3=H_4+h_f$. Donde h_f son las pérdidas en la transición de salida.

El valor de z_4 será la diferencia entre H_4 y E_4.

Caso de tener una cota z_4 predeterminada por la topografía del terreno, no es posible fijar el calado de salida. Siendo necesario su cálculo como en los casos anteriores, mediante la resolución de la ecuación.

En ambas transiciones se deberá comprobar que las pendientes no superan el 4:1.

h) Borde Libre

Con las cotas de la lámina obtenidas y aplicando el criterio del USBR se determina sin dificultad.

Video nº 2.4. Diseño hidráulico de acueductos



mcm@ingnova.es http://academia.ingnova.es/ 957 089 233 / 957 085 675